

УДК 621.382: 535.376

Д. т. н. А. С. ТУРЦЕВИЧ¹, к. т. н. И. И. РУБЦЕВИЧ¹, к. т. н. Я. А. СОЛОВЬЕВ¹,
О. С. ВАСЬКОВ², д. ф.-м. н. В. К. КОНОНЕНКО², к. т. н. В. С. НИСС², А. Ф. КЕРЕНЦЕВ¹Республика Беларусь, г. Минск, ¹ОАО «ИНТЕГРАЛ», ²БНТУ

E-mail: AKerentsev@transistor.com.by

ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ПАЙКИ КРИСТАЛЛОВ МОЩНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ РЕЛАКСАЦИОННЫМ ИМПЕДАНС-СПЕКТРОМЕТРОМ

Исследованы дифференциальные профили распределения теплового сопротивления «переход — корпус» транзисторов КП723Г в зависимости от условий монтажа кристаллов в корпус. Спектры тепловых сопротивлений рассчитывались из анализа временной зависимости динамического теплового импеданса, полученной новым неразрушающим методом дифференциальной спектроскопии. Представлена зависимость внутреннего теплового сопротивления компонентов транзисторной структуры от постоянной времени тепловой релаксации.

Ключевые слова: транзистор, тепловое сопротивление, релаксационный импеданс-спектрометр, посадка кристалла.

Работа мощного транзистора в экстремальных режимах эксплуатации при токах более 20 А приводит к развитию тепловых потоков в объеме полупроводникового кристалла, которые служат основной причиной отказов. Прогнозирование возможных механизмов деградации связано с закономерностями распространения теплоты в кристалле. При этом дефекты формирования паяного соединения (особенно в условиях пассивного процесса монтажа кристаллов, когда на них действуют только силы гравитации и поверхностного натяжения расплава припоя) оказывают значительное влияние на теплоэлектрическое состояние мощного транзистора, вызывая перегрев структуры, изменение электрических параметров и снижение его надежности [1–3].

При существующем уровне технологии посадки кристаллов на теплоотводящее основание отвод тепла от кристаллов мощных полупроводниковых приборов является одним из основных факторов, сдерживающих развитие силовой электроники, т. к. перегрев кристалла приводит к быстрой деградации его характеристик и к резкому снижению времени работы или отказу приборов.

Последние исследования в этой области показывают, что определяющий вклад в тепловое сопротивление слоистых структур вносит anomalно высокое сопротивление тонкой области (менее 50 нм) вблизи интерфейсной границы структуры. Это приводит к необходимости анализа составляющих внутреннего теплового сопротивления для силовых полупроводниковых приборов.

Наиболее передовые позиции в разработке и внедрении методов, позволяющих определить составляющие теплового сопротивления полупроводниковых приборов, занимает с тепловым тестером T3Ster компания MicReD, входящая в

консорциум Mentor Graphics. Метод, разработанный MicReD, основывается на рассчитываемых из временной релаксации измеряемого теплового сопротивления так называемых кумулятивной и дифференциальной структурных функций [4, 5]. Затем из их анализа определяются эквивалентные модели теплофизических процессов по схемам Фостера и Кауэра, которые, как считается, соответствуют реальной физической природе теплового сопротивления прибора. Данный метод основан на сложных многоступенчатых преобразованиях, что приводит к накоплению систематических ошибок и, как следствие, к появлению ложных пиков теплового сопротивления и к потере точности. Кроме того, метод требует сложной вычислительной техники и, соответственно, больших временных затрат на обработку результатов. Поэтому была поставлена задача — разработать и апробировать простую эффективную методику определения основных тепловых параметров и характеристик мощных полевых МОП-транзисторов.

Релаксационная спектроскопия

Метод релаксационной дифференциальной спектроскопии тепловых процессов, разработанный в БНТУ, позволяет достичь более высокой информативности и точности. В частности, при анализе теплового сопротивления слоя припоя под кристаллом («посадки») достигнуто более высокое спектральное разрешение (минимум в три раза) в сравнении с известными методами, что позволяет идентифицировать субмикронные интерфейсные границы «полупроводник — металл».

Перегрев ΔT активной области прибора определяется полным тепловым сопротивлением его элементов и межэлементных соединений между $p-n$ -переходом и теплоотводом. Согласно элек-

тротепловой аналогии, переходные процессы в полупроводниковой структуре описываются эквивалентными схемами в виде RC -цепочек — схемами Фостера и Кауэра [6]. При остывании прибора временная зависимость перегрева следует простому закону:

$$\Delta T(t) = P_T \sum_i^n R_i \exp(-t/\tau_i), \quad (1)$$

где P_T — тепловая мощность, рассеиваемая прибором;
 R_i — тепловое сопротивление i -го структурного элемента;
 τ_i — постоянная времени тепловой релаксации,
 $\tau_i = R_i C_i$;
 C_i — теплоемкость i -го элемента конструкции;
 n — число компонентов.

В общем случае тепловое сопротивление структуры R_T равно сумме значений R_i всех структурных компонентов прибора. Динамическое тепловое сопротивление задается как $R_T^*(t) = \Delta T(t)/P_T$ и находится из функциональной зависимости [6]

$$R^*(t) = \sum_i^n R_i \exp(1 - t/\tau_i) t/\tau_i. \quad (2)$$

Как видно, в случае когда постоянные времени тепловой релаксации τ_i для ближайших компонентов структуры различаются достаточно сильно, величина $R^*(t)$ при $t \approx \tau_i$ дает значения теплового сопротивления R_i для i -го компонента.

Однако для сложных многослойных структур, к которым относятся современные полупроводниковые приборы, дифференциальная зависимость (2) малоинформативна, поэтому ее целесообразно преобразовать в функцию более высокого порядка, например m -го, в виде

$$R_m^*(t) = \sum_i^n R_i \left(\frac{t}{m\tau_i} \right)^m \exp \left(m \left(1 - \frac{t}{m\tau_i} \right) \right). \quad (3)$$

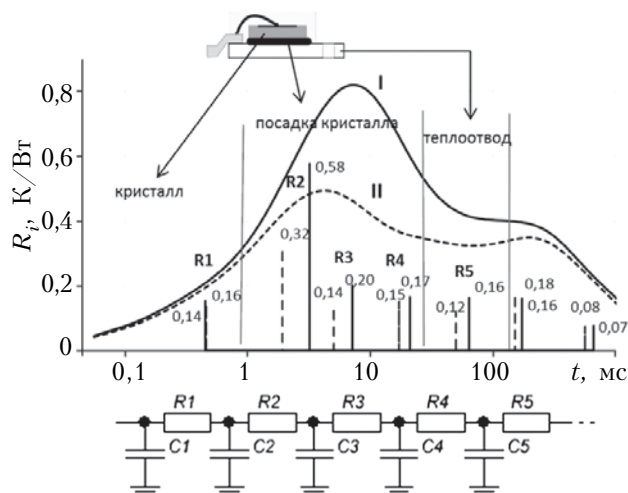


Рис. 1. Непрерывные и дискретные спектры теплового сопротивления транзисторов при разных режимах пайки кристалла (I и II)

Переход от (2) к (3) позволяет, используя цифровые данные измерений, наиболее точно определить тепловые параметры R_i и τ_i структурных элементов.

Для представления дифференциального спектра теплового сопротивления $R_T^*(t)$ достаточно ограничиться порядком $m=3$. При задании достаточно большого числа n структурных компонентов можно определить также дискретный спектр теплового сопротивления. Обычно число анализируемых структурных элементов определяется мощностью программных симуляторов или эффективностью используемых нестационарных тепловых тестеров и ограничивается значением 3–5 (из-за технических трудностей проведения измерений и сложности анализа) [4, 5]. Развита дифференциальная методика дает возможность расширить число исследуемых тепловых структурных элементов до 10.

Пример спектров теплового сопротивления транзисторов приведен на рис. 1. Здесь использована семизвенная схема Кауэра.

Экспериментальные результаты

Распространение теплового потока от активного слоя кристалла к корпусу в транзисторе КП723Г в первом приближении описывается одномерной моделью, показанной на рис. 2. Внутреннее тепловое сопротивление транзистора R_{jc} (сопротивление «переход — корпус») равно сумме тепловых сопротивлений компонентов структуры и аппроксимируется цепью из трех сопротивлений: R_1 — тепловое сопротивление кристалла; R_2 — сопротивление границы «кристалл — припой»; R_3 — сопротивление припоя. При измерениях выбиралась временная область, в которой спектры аппроксимировались семизвенной (7-го порядка) RC -цепью, где R_4 — тепловое сопротивление границы «припой — теплоотвод», R_5 — сопротивление теплоотвода (основания), а R_6 и R_7 — усеченная часть сопротивления «корпус — внешняя среда». Тепловое сопротивление «переход — внешняя среда» составляет порядка 75 К/Вт для корпуса КТ28 (ТО220).

Исследование качества монтажа кристаллов транзистора КП723Г на припой в среде водорода при температурах 360–440°C проведено с использованием разработанного релаксационного

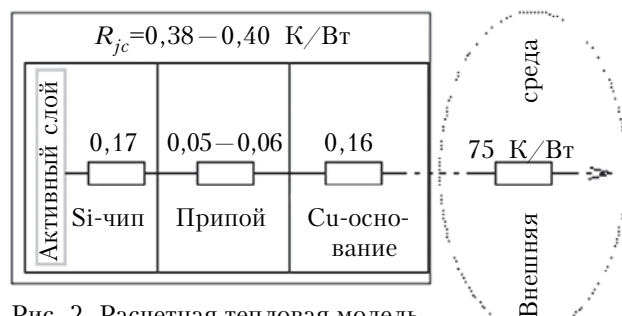


Рис. 2. Расчетная тепловая модель теплового сопротивления транзистора КП723Г

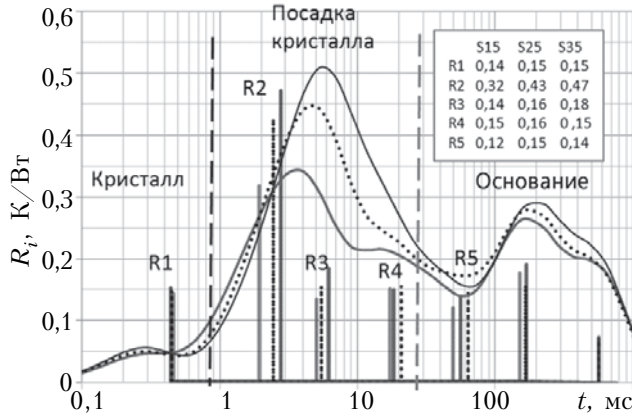


Рис. 3. Спектры теплового сопротивления транзисторов S15, S25 и S35 в представлении схемы Кауэра

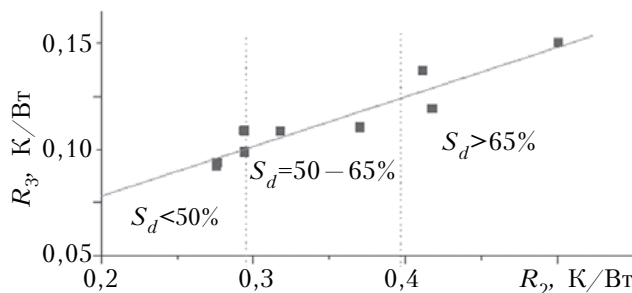


Рис. 4. Оценка площади дефектов (воздушных карманов) границы «кристалл — припой» из анализа взаимосвязи компонентов R_3 и R_2 теплового сопротивления транзисторов КП723Г

импеданс-спектрометра [7]. Спектрометр, предназначенный для комплексного анализа полупроводниковых структур, измеряет температуру активной области приборов и ее временную зависимость при различных значениях прямого тока, определяет внутреннее тепловое сопротивление прибора и его составляющие в виде временного спектра (зависимости от тепловых постоянных времени), что позволяет проводить в том числе и анализ качества посадки кристалла на теплоотводящее основание.

Анализ спектров девяти партий транзисторов КП723Г показывает, что наиболее существенный вклад (порядка 50%) в тепловое сопротивление R_{jc} вносит аномально высокое сопротивление границы «кристалл — припой» R_2 , как видно из рис. 3. Причин этого несколько — рассогласование фоновых подсистем по обе стороны границы «металл — полупроводник», возникновение скачка температуры из-за граничных термогальваномангнитных эффектов, наличие воздушных карманов на границе «кристалл — припой».

Анализ разброса значений теплового сопротивления R_{jc} для различных транзисторов показывает, что основной вклад в изменения вносят сопротивления границы R_2 и слоя припоя R_3 (73 и 18 % соответственно), остальные компоненты — порядка 10%.

Взаимозависимости R_2 , R_3 и R_{jc} — линейные с индексом корреляции 0,99 для R_2 и 0,96 для

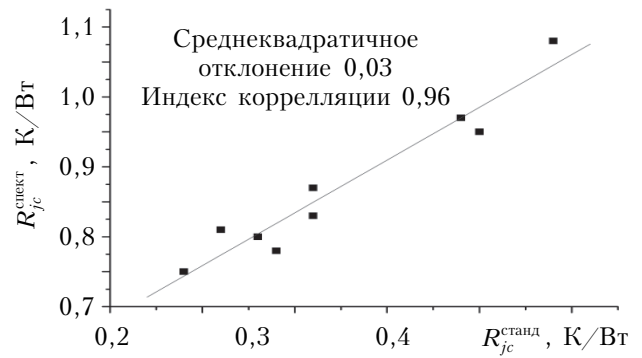


Рис. 5. Результаты измерений теплового сопротивления стандартным методом ($R_{jc}^{\text{станд}}$) и методом релаксационной импеданс-спектрометрии ($R_{jc}^{\text{спект}}$) для девяти транзисторов КП723Г с разными режимами посадки кристаллов

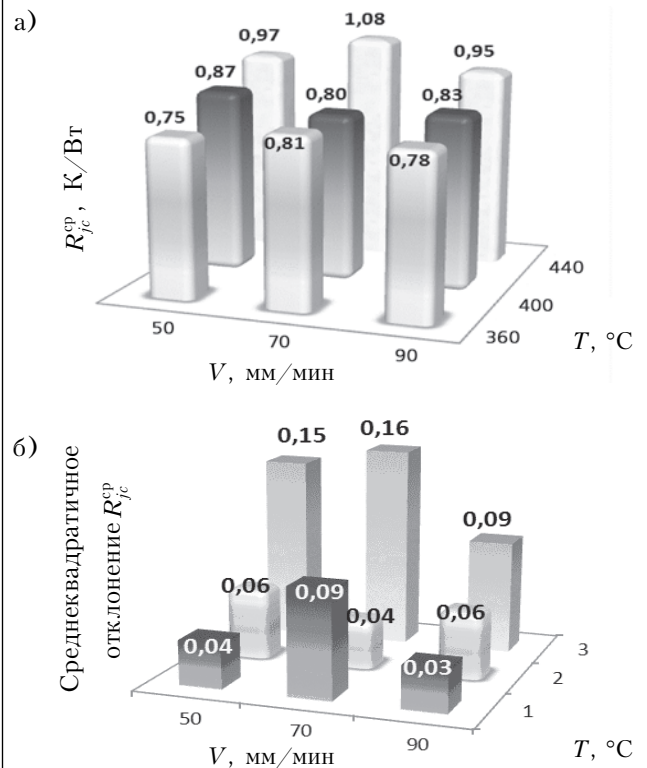


Рис. 6. Изменение среднего значения теплового сопротивления R_{jc}^{cp} (a) и его среднеквадратичного отклонения (б) для девяти партий транзисторов КП723Г, полученных при разных режимах посадки кристаллов (V — скорость конвейера водородной печи и T — температура пайки кристаллов)

R_3 . Поскольку воздушные карманы относятся к основному типу дефектов границы «кристалл — припой», изменение всех компонентов теплового сопротивления транзистора в первом приближении определяется изменением сечения теплового потока от активного слоя к корпусу прибора.

Зависимость $R_3(R_2)$ следует линейному закону (рис. 4) с высокой достоверностью аппроксимации (индекс корреляции равен 0,94). Примечательно, что при отсутствии дефектов (воздушных карманов) на границе «кристалл — припой»,

т. е. при $R_2=0$, эффективное сопротивление слоя припоя $R_{30}=0,056$ К/Вт совпадает с его расчетным значением.

Следовательно, можно предположить, что эффективное сопротивление слоя припоя R_3 линейно связано с площадью дефектов (воздушных карманов) S_d границы «кристалл — припой». Отсюда можно оценить их относительную площадь: $S_d/S_a=1-R_{30}/R_3=1-0,056/R_3$ (S_a — активная (рабочая) площадь транзистора).

Режимы посадки кристаллов были разными для разных партий транзисторов, что отражалось на измеренных значениях теплового сопротивления. Методами разрушающего контроля были экспериментально определены пустоты в слое припоя. По новой методике определяли тепловое сопротивление припоя. Результаты определения теплового сопротивления транзисторов с использованием независимых методик достаточно хорошо коррелируют между собой (рис. 5). Совпадение результатов демонстрирует надежность полученных данных. При этом тенденции изменения среднего R_{jc} и среднеквадратического отклонения теплового сопротивления в партии транзисторов совпадают для групп, полученных при одинаковых режимах (рис. 6).

Выводы

Анализ спектров для девяти партий транзисторов КП723Г показал, что наиболее существенный вклад в тепловое сопротивление «переход — корпус» вносит тепловое сопротивление границы «кристалл — припой». Разброс теплового сопротивления транзисторов определяется площадью дефектов границы «кристалл — припой», а их площадь составляет 45–65% от площади кристалла. Основным типом дефектов являются воздушные карманы (пустоты) в слое припоя. При этом тепловое сопротивление транзисторов возрастает с ростом температуры пайки кристалла для заданных режимов посадки.

Таким образом показано, что с помощью релаксационного спектрометра тепловых процессов можно не только исследовать дифференциальные профили распределения теплового сопротивления «переход — корпус» транзисторов, но и проводить анализ качества посадки кристаллов на теплоотводящее основание неразрушающим методом.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Бумай Ю. А., Васьков О. С., Ануфриев Л. П. и др. Проблемы посадки кристаллов мощных кремниевых MOSFET транзисторов // Сб. науч. тр. II Конгресса физиков Беларуси. — РБ, Минск. — 2008. — С. 97–98. [Bumai Yu. A., Vas'kov O. S., Anufriev L. P. i dr. // Sb. nauch. tr. II Kongressa fizikov Belarusi. RB, Minsk. 2008. P. 97]
2. Ануфриев Л. П., Керенцев А. Ф., Ланин В. Л. Автоматизированный монтаж кристаллов транзисторов вибрационной пайкой // Технологии в электронной промышленности. — 2006. — № 3. — С. 47–50. [Anufriev L. P., Kerentsev A. F., Lanin V. L. // Tekhnologii v elektronnoi promyshlennosti. 2006. N 3. P. 47]
3. Керенцев А. Ф., Ланин В. Л. Конструктивно-технологические особенности MOSFET-транзисторов // Компоненты и

технологии. — 2007. — № 4. — С. 100–104. [Kerentsev A. F., Lanin V. L. // Komponenty i tekhnologii. 2007. N 4. P. 100]

4. Szekely V., Bien T. V. Fine structure of heat flow path in semiconductor devices: A measurement and identification method // Solid-State Electron. — 1988. — Vol. 31, N 9. — P. 1363–1368.

5. Schweitzer D., Pape H., Chen L. Transient measurement of the junction-to-case thermal resistance using structure functions: chances and limits // Proc. of 24th IEEE SEMI-THERM Symposium. — San Jose, California, USA. — 2008. — P. 193–199.

6. Bumai Yu. A., Vaskou A. S., Kononenko V. K. Measurement and analysis of thermal parameters and efficiency of laser heterostructures and light-emitting diodes // Metrology and Measurement Systems. — 2010. — Vol. 17, N 1. — P. 39–46.

7. Бумай Ю. А., Васьков О. С., Кононенко В. К., Ломако В. М. Релаксационный импеданс-спектрометр тепловых процессов // Электроника инфо. — 2010. — № 3. — С. 58–59. [Bumai Yu. A., Vas'kov O. S., Kononenko V. K., Lomako V. M. // Elektronika info. 2010. N 3. P. 58]

8. Васьков О. С., Кононенко В. К., Нисс В. С. Метод тепловой релаксационной спектрометрии и определение параметров светодиодов // Докл. БГУИР. — 2011. — № 4. — С. 74–79. [Vas'kov O. S., Kononenko V. K., Niss V. S. // Dokl. BGUR. 2011. N 4. P. 74]

Дата поступления рукописи
в редакцию 05.06 2012 г.

Turtsevich A. S., Rubtsevich I. I., Solov'yov Ya. A., Vas'kov O. S., Kononenko V. K., Niss V. S., Kerentsev A. F. **The investigation of quality of power-transistor crystals soldering by a transient impedance-spectrometer.**

Keywords: transistor, thermal resistance, transient impedance-spectrometer, crystal attachment.

Differential distribution profiles of the thermal «junction-to-case» resistance of KP723G transistors in accordance with the attachment of the crystals into the package have been investigated. Spectra of thermal resistances were calculated from the analysis of the temporal dependence of the dynamic thermal impedance obtained by a new non-destructive method of differential spectroscopy. The dependence of internal thermal resistance of transistor structure components on the thermal relaxation time constant is presented.

Belarus, Minsk, JSC «INTEGRAL», BNTU.

Турцевич А. С., Рубцевич І. І., Соловйов Я. О., Васьков О. С., Кононенко В. К., Нісс В. С., Керенцев А. Ф. **Дослідження якості паяння кристалів потужних транзисторів релаксацийним імпеданс-спектрометром.**

Ключові слова: транзистор, тепловий опір, релаксацийний імпеданс-спектрометр, посадка кристалу.

Досліджено диференціальні профілі розподілу теплового опору «перехід — корпус» транзисторів КП723Г залежно від умов монтажу кристалів у корпус. Спектри теплового опору розраховувалися через аналіз часової залежності динамічного теплового імпедансу, який отримано новим неруйнівним методом диференціальної спектроскопії. Наведено залежність внутрішнього теплового опору компонентів транзисторної структури від сталої часу теплової релаксації.

Білорусія, м. Мінськ, ВАТ «ІНТЕГРАЛ», БНТУ.